



TITLE:

Simulation Study on Enhancements of Energetic Heavy Ions in the Magnetosphere(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Nakayama, Yohei

CITATION:

Nakayama, Yohei. Simulation Study on Enhancements of Energetic Heavy Ions in the Magnetosphere. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20089>

RIGHT:

京都大学	博士（工 学）	氏名	中山 洋平
論文題目	Simulation Study on Enhancements of Energetic Heavy Ions in the Magnetosphere (計算機シミュレーションによる磁気圏高エネルギー重イオン急増現象の解明)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は宇宙擾乱現象であるサブストーム発生時の磁気圏高エネルギー重イオン(酸素イオン)増加現象の理解を目的として、大規模シミュレーションコードの開発とその実行結果の解析を行なった成果についてまとめたものであり、7章で構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景として地球周辺のプラズマ環境の概要とその変動の特徴について述べている。また、サブストーム発生時の高エネルギー酸素イオン増加現象について、これまでの研究を総括し、未解明である問題について説明している。そして、本論文の目的であるシミュレーションによる酸素イオン増加現象の理解の必要性・学術的意義を述べている。</p> <p>第2章では、本論文で用いたグローバル MHD シミュレーションおよびテスト粒子シミュレーションの手法について述べられている。このグローバル MHD シミュレーションでは、複雑な非構造グリッドと物理量の保存を保証する FVTVD スキームを採用しており、サブストーム発生時の現実的な電磁場変動を自己無撞着に再現可能となっている。また、テスト粒子シミュレーションでは酸素イオンの粒子本体とその案内中心の軌道を計算する方法を粒子旋回半径と磁力線の曲率半径の比に応じて切り替えており、酸素イオンのグローバルな断熱、非断熱運動を高速に解くことのできる粒子コードとなっている。</p> <p>第3章では、磁気圏尾部における酸素イオンの突発的な非断熱加速を再現するシミュレーションの開発に取り組んだ。磁気圏尾部で発生する複雑な軌道の粒子を大量に計算するため、京都大学のスーパーコンピュータを用いた計算の並列化や電磁場読み込みアルゴリズム、グリッド検索アルゴリズム等の改良を施した高速粒子計算コードを開発した。この高速粒子計算コードによる大量粒子(10 億個程度)のテスト粒子シミュレーションを行った結果、酸素イオンは尾部で発生する西向き電場によって非断熱加速を受け、数分以内に数 10 keV～数 100 keV にエネルギー増加することが明らかになった。またシミュレーション結果に対し、位相空間写像法を用いることにより、衛星によってサブストーム発生時に尾部で観測される酸素イオンフラックス増加を高精度に再現することに成功した。そしてシミュレーションの解析より、背景の電磁場変動と酸素イオンフラックス増加の関係性を明らかにした。</p> <p>第4章では、Van Allen Probes 衛星で観測されたサブストーム発生時に高エネルギー酸素イオンがある特殊なエネルギー分散構造を持って増大する現象に着目し、シミュレーションによる解析に取り組んだ。3章で開発したシミュレーションを用いて観測された特殊なエネルギー分散構造の再現に成功し、シミュレーション結果の解析により、この特殊なエネルギー構造の発生原因がサブストームに伴う背景プラズマ流の変化と準静電的な酸素イオン加速であることを明らかにした。</p> <p>第5章では、酸素イオンの起源である電離圏から内部磁気圏に至る広い領域の軌道を計算し、サブストームに伴う様々な酸素イオン加速を包括的に再現するシミュレーションの開発に取り組んだ。開発したシミュレーションは近年の衛星観測結果を高精度に再現することに成功した。また、シミュレーション結果解析より、先行研究にて</p>			

京都大学	博士（工 学）	氏名	中山 洋平
<p>高エネルギー酸素イオン増加原因として提案されている磁気圏尾部における突発的な非断熱加速と電離圏からの供給の両機構の高エネルギー酸素イオンの増加全体への寄与を調べた。その結果、サブストーム発生時の高エネルギー酸素イオンの増加には電離圏で熱化された酸素イオンの磁気圏尾部における突発的な非断熱加速の寄与が大きく、約 90%以上の高エネルギー酸素イオンはの加速過程によって生成され内部磁気圏高エネルギー粒子群のリングカレントを構成することを明らかにした。</p> <p>第 6 章では、地球の夜側磁力線がサブストーム時に東西方向に歪む現象に着目し、内部磁気圏で発生するこの現象の高エネルギー酸素イオン群への影響を調べた。グローバル MHD 電磁場中での粒子軌道計算を行った結果、この電磁場構造ではある特定のピッチ角の酸素イオンに対して、非常に高効率な加速が発生し、酸素イオンは数分以内に数 keV から 100keV 以上にエネルギーが増加することを明らかにした。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は宇宙電磁擾乱現象であるサブストーム発生時の磁気圏高エネルギー重イオン(酸素イオン)増加現象の理解を目的として、大規模シミュレーションコードの開発とその実行結果の解析を行なった成果についてまとめたものである。具体的には、高エネルギー酸素イオン増加原因として提案されている磁気圏尾部における突発的な非断熱加速、電離圏オーロラ領域からの直接供給、特殊な電磁状況による局所的な加速の3つの加速機構を再現するテスト粒子シミュレーションコードの開発を行った。そして、電磁流体シミュレーションによって決定された電磁場情報のもとでテスト粒子シミュレーションを行うことによって、各機構の発生メカニズムの定量的理解と高エネルギー酸素イオン増加全体への各機構の寄与量の解明に取り組んだ。本論文で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 磁気圏尾部における突発的な非断熱加速による酸素イオンフラックス増加を高精度に再現するシミュレーションコードを開発し、背景の電場変動に伴うフラックス増加について明らかにした。
- (2) Van Allen Probes 衛星観測より酸素イオンの新たなエネルギー分散を発見し、その発生原因がサブストームに伴う背景プラズマ流の変化と準静電的加速であることを明らかにした。
- (3) 磁気圏尾部における突発的な非断熱加速と電離圏からの供給の両方を再現出来る大規模シミュレーションコードを開発し、高エネルギー酸素イオンの増加には磁気圏尾部における突発的な非断熱加速の寄与が大きく、約 95%以上の高エネルギー酸素イオンはこの加速過程によって生成され内部磁気圏高エネルギー酸素イオン群を形成していることを明らかにした。
- (4) 地球の夜側磁力線がサブストーム時に東西方向に歪む現象に着目した。そして、この磁場構造では特定のピッチ角をもつ酸素イオンに対して非常に高効率な加速が発生し、酸素イオンは数分以内に数 keV から 100keV 以上にエネルギーが増加することを明らかにした。

以上、本論文は未解明であった高エネルギー酸素イオン増加過程について、起源である電離圏から内部磁気圏へ至るまでの加速・輸送を包括的にシミュレーションで再現し、サブストームに伴う磁気圏酸素イオン加速の様相を明らかにした学術意義の高いものであり、開発したシミュレーションコードは様々な磁気圏研究への応用が期待できる。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 12 月 9 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。